塔里木河流域生态系统碳储量的情景预测分析

付 玮[1]， 夏文浩[1]， 樊童生[2]， 邹 贞[1]， 霍 瑜[1]

（1. 塔里木大学经济与管理学院，新疆 阿拉尔 843300；
2. 南宁师范大学自然资源与测绘学院，广西 南宁 530001）

摘 要： 土地利用方式是引起陆地生态系统碳储量变化的重要因素，对维持碳储量水平稳定有着关键作用。通过利用耦合的PLUS-InVEST模型评估与预测塔里木河流域1980—2020年土地利用与碳储量变化情况，设置自然发展、生态保护、耕地保护和城镇发展4种场景，分情景预测2030年研究区土地利用及碳储量的变化趋势，在此基础上探究土地利用变化对碳储量的影响。结果表明：（1）40 a间塔里木河流域耕地、建设用地与未利用地面积显著增加，林地、草地和水域面积减少。（2）40 a间1980—2020年碳储量总体呈上升趋势，总体增加了$22.66×10^6$ t，碳储量增加区域主要分布在塔里木河干流及其分支上。未利用地和草地是塔里木河流域主要的碳库，占碳储量总量的24.77%和19.37%。（3）情景预测发现2020年后碳储量流失量较大且流失速度逐渐较加快，碳储量减少区域主要分布在研究区的中西南部，未来草地向未利用地及林地向草地的转移均是碳储量流失主要原因，4种情景下分别减少了$0.0475×10^8$ t、$0.0051×10^8$ t、$0.0285×10^8$ t及$0.0473×10^8$ t。（4）耕地向林地、草地向林地、水域向草地及未利用地、未利用地向耕地及草地的转出都有利于碳储存。因此，在未来规划中，应耕地保护和生态保护相结合，在控制建设用地向外扩张的同时保证当地经济增长，提高碳储量水平，为实现“双碳”目标蓄力。

关 键 词： 塔里木河流域；土地利用；碳储量；PLUS模型；InVEST模型；新疆

文章编号： 1000－6060(2024)04－0634－14(0634～0647)

全球气候变暖已危害到生态系统的稳定[1]和人类的可持续发展[2]，陆地生态系统是碳储量不可或缺的部分，其对平衡碳排放和碳吸收有着重要作用[3]。陆地生态系统的碳储量是由地上、地下、土壤和死亡有机物4种碳密度组成。土地利用的固碳能力根据其类型的不同存在一定的差异性，土地利用的变化将直接影响到陆地生态系统碳储量[4-5]。近年来，由于人类活动、自然气候等因素导致土地利用发生改变，而土地利用的变化会影响碳储量其及循环，从而改变研究区固碳能力影响碳存储[6-7]。因此，把握土地利用与碳储量时空格局演化的客观规律，模拟预测土地利用变化和碳储量对区域的可持续发展维持碳平衡有着重要意义。

关于土地利用研究的探索多集中于土地利用预测、碳储量评估、生态系统服务价值评估等视角，常用的预测模型有马尔科夫模型[8]、元胞自动机[9]、FLUS模型[10]、SD模型[11]、CLUE-S模型[12]等，但这些模型不能有效挖掘土地利用变化的特征、碳储量的空间变化格局以及土地利用变化和碳储量变化之间的关系。而PLUS模型相较于其他模型具备精度高、适应性强和处理数据速度快等优点，且已有研究经对比PLUS、FLUS、CLUE-S模型模拟黑河流域土地利用效果发现PLUS模型拟合效果最好[13]。牛统莉等[14]利用PLUS模型对长江流域土地利用的时空格局进行剖析，并模拟3种情景下长江流域的土地利用变化。谢向东等[15]运用PLUS模型模拟分析

收稿日期： 2023-06-11； **修订日期：** 2023-10-24
基金项目： 国家自然科学基金项目(71663045)；兵团社科基金项目(22YB22)；塔里木大学研究生科研创新项目(TDGRI202264)资助
作者简介： 付玮(1999-)，女，硕士研究生，主要从事资源与环境经济研究. E-mail: m18799927150@163.com
通讯作者： 霍瑜(1982-)，女，教授，博士，主要从事区域经济研究. E-mail: huoyu050301@163.com

重庆市南川区土地利用分布及2030年多情景下的差异。

此外，对陆地碳储量的估算多采用实地调查法和FORCCHN等模型模拟[16]，但这些估算方法存在数据采取复杂，适应力差等局限，而InVEST模型在数据参数较少的情况下能够精确的估算研究区碳储量，因而被广泛利用。很多学者采用InVEST模型计算区域碳储量情况，如许源溪等[17]通过InVEST模型计算宜宾市碳储存量，李月等[18]利用InVEST模型测算黔中典型喀斯特地区的陆地生态系统碳储量和其空间分布。部分学者通过采用PLUS模型和InVEST模型相结合估算和预测研究区的土地利用和碳储量的分布格局，杨潋威等[19]采用PLUS和InVEST模型预测西安市未来不同情景下土地利用和碳储量的时空特征；李俊等[16]、孙方虎等[3]、张鹏等[20]、孙欣欣等[5]、林彤等[21]，分别通过2个模型结合对昆明市、安徽省、邯郸市、南京市、鄱阳湖流域、广东省的土地利用和碳储量分布格局作了估算和预测。

目前关于塔里木河流域土地利用和碳储量的研究相对集中在土地利用时空演变[22-25]和碳储量动态评估[26-28]2个视角，而土地利用变化对碳储量的影响以及对研究区未来碳储量情景预测的研究相对较少。塔里木河流域地处新疆南部，位处塔克拉玛干沙漠腹地，当地水利工程建设相对滞后，生物多样性遭到破坏，土地沙漠化严重。因此，对该区域生态治理至关重要，相关生态保护政策和未来土地规划都需明确路径。

为此，本文以塔里木河流域为研究区，耦合PLUS模型和InVEST模型，采用1980—2020年土地利用数据与驱动因素数据，分析和评估40 a土地利用和碳储量的时空格局特征，同时借助多情景模拟预测2030年不同情景下塔里木河流域的未来土地利用和碳储量分布格局特征。通过对塔里木河流域土地利用和碳储量的模拟，为塔里木河流域生态环境保护及碳储量研究和实现“双碳”目标提供一定的科学依据。

1　研究区概况

塔里木河流域(75°06′~92°50′E，36°30′~42°10′N，图1)位于新疆南部，全长2179 km，是世界上最大内陆河流域。其是塔里木河干流和其分支河流汇合而成，主要补水源为冰川融水，面积约为10.5×10^5 km^2。流域间高山平原相间，沙漠处研究区中腹，其面积占37.04×10^4 km^2。塔里木河流域位处欧亚大陆腹地，远离海洋，四面环山，昼夜温差大，夏季平均气温在20~30 ℃，冬季平均气温在-10~-20 ℃，降水稀少，蒸发强烈，是典型的干旱大陆气候，属于干旱暖温带。其中研究区土地利用类型多以未利用地和草地为主[26]。



图1　塔里木河流域示意图

Fig. 1　Schematic diagram of the Tarim River Basin

2 数据与方法

2.1 数据来源与处理

本文用于模拟未来土地利用的数据包括：自然条件、社会经济和交通区位(表1)。其中土地利用碳密度数据如表2。综合考虑模型的适用性及其精度，结合自然条件、社会经济和交通区位，将土地利用变化引入14个驱动因子，并采用PLUS模型中随机森林法来处理驱动因子间的空间自相关和多重共线性[27]。对所用到的碳库数据与研究区相关的基InVEST模型的碳储量采用的碳库数据进行对比，筛除异常值并进行分析，最终得到碳库数据[21,28]。

2.2 研究方法

2.2.1 InVEST模型 InVEST模型用于模拟不同土地覆被情景下将生态服务功能量和经济价值空间化和可视化[29-30]，本文采用陆地生态系统中碳储存模块，该模块的区域总碳储量主要由4个碳库分别乘以各类土地利用面积后求和，其计算公式如下：

$$C_i = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \tag{1}$$

$$C_{it} = \sum_{i=1}^{n} C_i \times S_i \tag{2}$$

式中：C_i 为 i 类土地类型所含碳密度；C_{above}、C_{below}、C_{soil} 和 C_{dead} 分别为地上、地下、土壤和死亡有机物碳密度；C_{it} 为区域总碳储量；S_i 为 i 类土地利用类型的面积。本文结合前人研究[31-33]中修正的碳密度数据，并对其进行对比修正筛除异常值，最终得到塔里木河流域各土地类型的碳密度表(表2)。

对地上、地下和土壤碳储量的修正公式如下：

$$\begin{aligned}
&C_{BP} = 6.798 \times e^{0.005 \times P_{MA}} \\
&C_{SP} = 3.3968 \times P_{MA} + 3.9961 \\
&C_{BT} = 28 \times T_{MA} + 398 \\
&K_{BP} = \frac{C_{BP}^1}{C_{BP}^2} \\
&K_{SP} = \frac{C_{SP}^1}{C_{SP}^2} \\
&K_{BT} = \frac{C_{BT}^1}{C_{BT}^2}
\end{aligned} \tag{3}$$

式中：P_{MA} 和 T_{MA} 分别为平均降水量和平均气温；C_{BP}、C_{SP} 和 C_{BT} 分别为平均降水量修正后得到的地上、土壤碳储量和平均气温修正的生物碳储量；K_{BP}、K_{SP} 和 K_{BT} 分别为地上碳储量降雨因子修正系数、土壤碳储量降雨因子修正系数和土壤碳储量温度因子修正系数；C^1 和 C^2 是根据全国和研究区的降水量与平均气温计算得到的数据。

2.2.2 PLUS模型 PLUS模型是基于现有土地类型，以栅格数据为基础对斑块级土地利用变化进行预测。该模型通过提取土地利用数据之间的各土地利用类别之间相互转换的样本，同时基于转移概率对土地利用进行模拟。对各土地类别扩张和驱动因素的计算采用随机森林算法，以得到各土地类别的发展潜力及驱动因子的贡献[34]。本研究以

表1 数据及来源

Tab. 1 Data and sources

类型	名称	分辨率/m	数据来源
基础数据	土地利用数据	30	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
自然条件	土壤类型	1000	HWSD世界土壤数据库(http://westdc.westgis.ac.cn/)
	年平均气温	1000	中国气象数据网(htpp://www.nmic.cn)
	年降水量	1000	中国气象数据网(htpp://www.nmic.cn)
	DEM	30	地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)
	坡度	30	对DEM进行坡度分析
社会经济	人口	1000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
	GDP	1000	中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)
交通区位	距一级道路距离	30	OpenstreetMap(http://www.openstreetmap.org/)
	距二级道路距离	30	OpenstreetMap(http://www.openstreetmap.org/)
	距三级道路距离	30	OpenstreetMap(http://www.openstreetmap.org/)
	距高速公路距离	30	OpenstreetMap(http://www.openstreetmap.org/)
	距铁路距离	30	OpenstreetMap(http://www.openstreetmap.org/)
	距火车站距离	30	国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn)
	邻近城市驻地距离	30	国家基础地理信息中心(http://www.ngcc.cn)

表2　土地利用碳密度

Tab. 2　Carbon density of land use　/t·hm⁻²

土地利用类型	地上碳密度	地下碳密度	土壤碳密度	死亡有机物碳密度	参考文献
耕地	3.4705	4.1202	86.2150	1.24	王绮等[31],颜安[33]
林地	36.9664	10.9131	121.3471	2.48	颜安[33]
草地	0.5839	5.1317	85.0168	0.22	周圣杰[32],颜安[33]
水域	0.7648	0.5428	0.0000	0.00	颜安[33]
建设用地	1.8833	1.7352	0.0000	0.00	周圣杰[32],颜安[33]
未利用地	0.5428	1.0362	43.3855	0.00	颜安[33]

1980年土地利用数据为基础,采用14个驱动因子模拟预测出2030年土地利用类型,同时基于1980—2020年土地利用的变化设置转移成本矩阵[20],其所集成的马尔科夫链可基于历史土地类型转移成本矩阵对未来土地类型变化进行预测,公式如下：

$$S_{t+1} = P_{ix} \times S_t \tag{4}$$

式中：S_{t+1} 为土地利用在 t+1 时刻的土地类型；P_{ix} 为土地类转移概率；S_t 为土地利用 t 时刻的土地类型。本文通过改变转移概率设置4种情景：自然增长、耕地保护、生态保护和城镇发展,并对未来4种不同情景下的土地利用类型进行预测。

转移矩阵是用于为不同情景下的土地类型之间是否能够发生转换而下的定义,其中可以发生转换用1表示,不可以发生转换用0表示。多情景模拟下土地利用的转移成本矩阵最终确定为表3,公式如下：

表3　多情景模拟下土地利用转换成本矩阵

Tab. 3　Cost matrix of land use conversion under multi-scenario simulation

情景	土地利用类型	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
自然增长	耕地	1	1	1	1	1	1
	林地	1	1	1	1	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	1	1	1	1	1
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	1	1	1
耕地保护	耕地	1	0	0	0	0	0
	林地	1	1	1	0	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	0	1	1	1	1
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	1	1	1
生态保护	耕地	1	1	1	1	1	1
	林地	0	1	0	0	0	0
	草地	0	1	1	1	0	0
	水域	0	0	0	1	0	0
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	1	1	1
城镇发展	耕地	1	0	0	0	1	0
	林地	1	1	1	0	1	1
	草地	1	1	1	1	1	1
	水域	1	1	1	1	0	1
	建设用地	0	0	0	0	1	0
	未利用地	1	1	1	0	1	1

$$\begin{cases} P_{i,x}^{d=1} > \tau, \ CM_{k,x} = 1 \text{土地类型转变} \\ P_{i,x}^{d=1} \leqslant \tau, \ CM_{k,x} = 0 \text{土地类型恒定} \\ \tau = \delta \times R_1 (0 < \delta \leqslant 1) \end{cases} \quad (5)$$

式中：$P_{i,x}^{d=1}$ 为土地类型向其他土地类型转移的概率；$CM_{k,x}$ 为转移矩阵，土地类型 k 向 x 转变或恒定；δ 为衰减阈值 τ 的衰减系数；R_1 符合正态分布。同时与2020年的实际数据作对比，PLUS模型的整体精度为94.531%，Kappa系数为0.9124，证明PLUS模型可信度高具有可靠性，可以用来预测塔里木河流域未来土地利用的变化情况。

3 结果与分析

3.1 土地利用变化分析

塔里木河流域40 a的土地利用分布及涨落势如图2、3所示。未利用地广泛分布在塔里木河流域的中间位置塔里木盆地塔克拉玛干沙漠，该区域气候干燥，植被稀疏；草地分布在塔里木河流域上，围绕在沙漠边缘；其次，水域和耕地分别分布在流域的西南侧和阿克苏河、叶尔羌河、喀什噶尔河干流，以及和田河、开孔河下流；林地和建设用地分别分布在塔里木河中上游，建设用地分布在耕地上。

其次，塔里木河流域40 a的土地利用是以草地与未利用地为主，水域和林地次之（表3~4）。40 a来，各地类都有明显的变化，草地和水域落势图中所呈现面积较广（图3a），其土地利用动态度呈负向增长。而耕地和建设用地土地利用动态度正向增长，以及涨势图中的二者面积都有明显的扩张（图3b），未利用地和林地面积分别有小幅的增加和减少，从表5中看出在研究时段内，土地利用类型中建设用地变化最为显著，其次是耕地、水域、草地、林地。其中耕地和建设用地的面积大幅度增加，在2000—2010年内二者的土地利用动态度分别为3.4574%和14.2387%，这是因为此时间内城市建设、城镇化进程的推进导致建设用地的扩张，其次为响应国家粮食安全政策，加大了对耕地及农用地的开

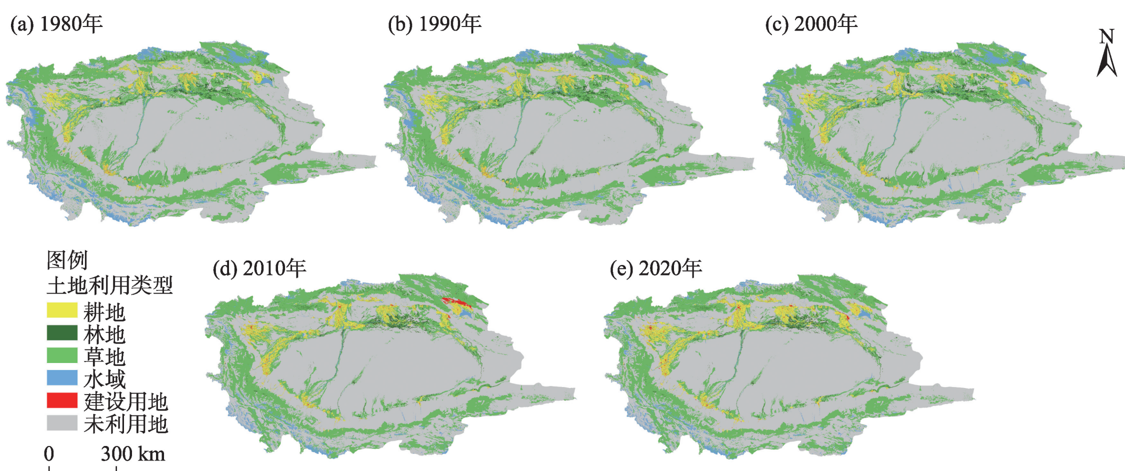


图2 1980—2020年土地利用分布

Fig. 2 Land use distribution map from 1980 to 2020

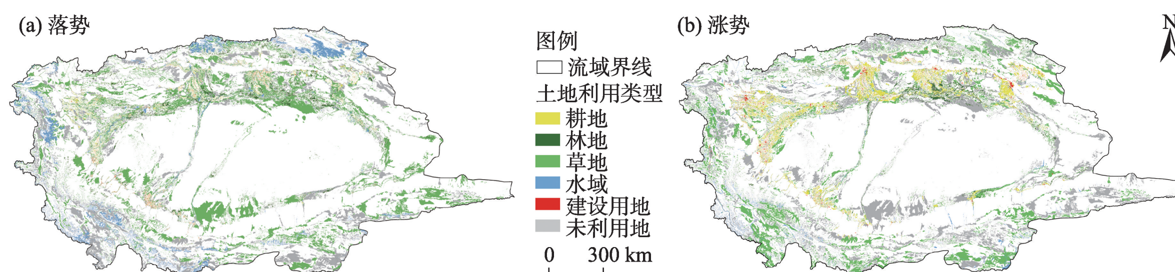


图3 1980—2020年土地利用落势、涨势图

Fig. 3 Land use fall and rise chart from 1980 to 2020

表4　1980—2020年土地利用面积

Tab. 4　Land use area from 1980 to 2020　/km²

土地利用类型	1980年	1990年	2000年	2010年	2020年
耕地	24541.47	24531.84	26750.16	35998.74	42418.44
林地	12886.38	12911.49	13546.80	12912.57	12703.50
草地	254001.87	254204.28	246313.89	233091.90	227369.97
水域	36360.81	36106.74	36823.77	21688.11	21978.72
建设用地	1517.13	1555.38	1497.15	3628.89	2689.92
未利用地	565992.18	565990.11	570368.07	587979.63	588139.29

表5　1980—2020年土地利用动态度

Tab. 5　Dynamic degree of land use from 1980 to 2020　/%

土地利用类型	1980—1990年	1990—2000年	2000—2010年	2010—2020年
耕地	−0.0039	0.9043	3.4574	1.7833
林地	0.0195	0.4921	−0.4682	−0.1619
草地	0.0080	−0.3104	−0.5368	−0.2455
水域	−0.0699	0.1986	−4.1103	0.1340
建设用地	0.2521	−0.3744	14.2387	−2.5875
未利用地	0.0000	0.0774	0.3088	0.0027

注：土地利用动态度是定量描述在一定时间内，研究区某种土地利用类型的变化情况，是某种土地利用类型在特定时段内动态变化的幅度及速率[27,29]，其公式为：$K=\frac{U_a-U_b}{U_a}\times\frac{1}{T}\times100\%$。其中，$K$为某一时间内的土地利用动态度；$U_a$和$U_b$分别为研究区在初期和末期的土地利用面积；$T$为时间长。

垦。

为更清晰描述土地利用类型的流向，通过Origin软件制作桑基图对1980—2020年各个时期间土地利用类型之间的相互转化及总量分布(图4)进行可视化分析。40 a来耕地面积逐渐扩张了17876.97 km²，主要是草地和未利用地的流入，分别流入13063.14 km²和4164.75 km²；水域主要流向草地、未利用地和林地，其面积减少了14382.09 km²；而草地和未利用地、草地和耕地、草地和林地之间都存在着相互转化，其中林地和草地分别减少了182.87 km²和26631.9 km²，未利用地面积增加22147.11 km²(表6)。

其中2000—2010年间草地和未利用地存在明显的相互转化，归因为：过度放牧与不合理的人类

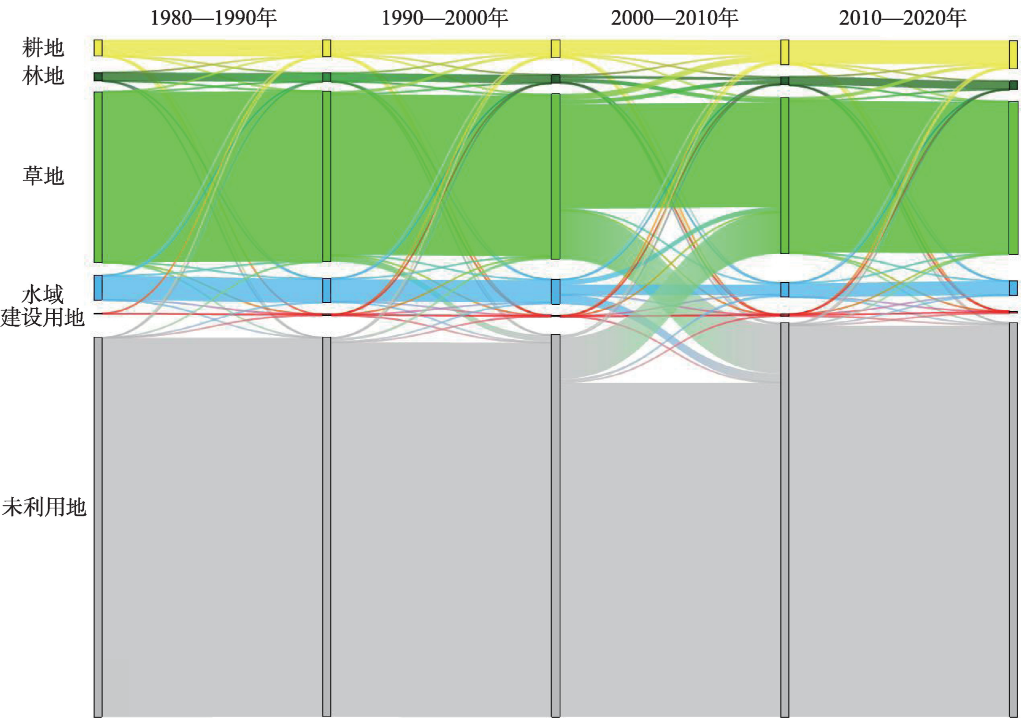


图4　1980—2020年塔里木河流域土地利用转移

Fig. 4　Land use transfer in the Tarim River Basin from 1980 to 2020

表6 1980—2020年土地利用转移矩阵

Tab. 6 Land use transfer matrix from 1980 to 2020

/km^2

1980年	2020年							转出
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总和	
耕地	20001.96	1044.63	1494.63	206.73	1318.68	474.84	24541.47	4539.51
林地	1865.34	3848.31	5432.76	259.11	58.14	1422.72	12886.38	9038.07
草地	14557.77	6331.50	152400.24	2686.14	328.05	77698.17	254001.87	101601.63
水域	418.23	222.03	7221.06	14606.46	9.00	13884.03	36360.81	21754.35
建设用地	935.55	90.63	62.37	8.73	391.14	28.71	1517.13	581.58
未利用地	4639.59	1166.40	60758.91	4211.55	584.91	494630.82	565992.18	71361.36
总和	42418.44	12703.50	227369.97	21978.72	2689.92	588139.29	895299.84	-
转入	22416.48	8855.19	74969.73	7372.26	2298.78	93508.47	-	209148.70

活动使得草地面积缩减[35]，土地荒漠化严重，同时在2002年新疆推进退耕还林还草等一系列政策，使得研究区生态修复有一定成效[36]，草地覆盖率逐渐增加；在此时间段内，水域面积转出显著，最主要原因是耕地面积的扩张导致农田灌溉用水增加[30]，水资源配置失衡，但随着生态输水和节水灌溉工程[37]实施后水域面积逐渐增加。

3.2 2030年土地利用模拟预测分析

基于PLUS模型，设置地类间不同情景下转移矩阵后，以1980—2020年为基准期预测2030年塔里木河流域4种不同情境下土地利用变化[21]情况(表7、图5)。

在自然发展情景下，耕地、水域和建设用地土地利用面积分别增加了5196.96 km^2、276.39 km^2 和468.99 km^2，其中耕地和建设用地的扩张与1980—2020年变化相一致，主要是归因于草地向耕地的转换，其次是林地和未利用地向水域和建设用地的转换，林地、草地和未利用地分别减少了193.14 km^2、5476.68 km^2和272.52 km^2。

表7 2030年多情景下土地利用面积

Tab. 7 Land use area under the multiple scenario in 2030

/km^2

土地利用类型	情景			
	自然发展	耕地保护	生态保护	城镇发展
耕地	47615.40	48078.45	40689.54	47617.20
林地	12510.36	12510.36	13342.32	12510.36
草地	221893.29	221893.20	227759.58	221893.29
水域	22255.11	22255.11	22255.11	22255.11
建设用地	3158.91	2695.95	3386.52	3157.11
未利用地	587866.77	587866.77	587866.77	587866.77

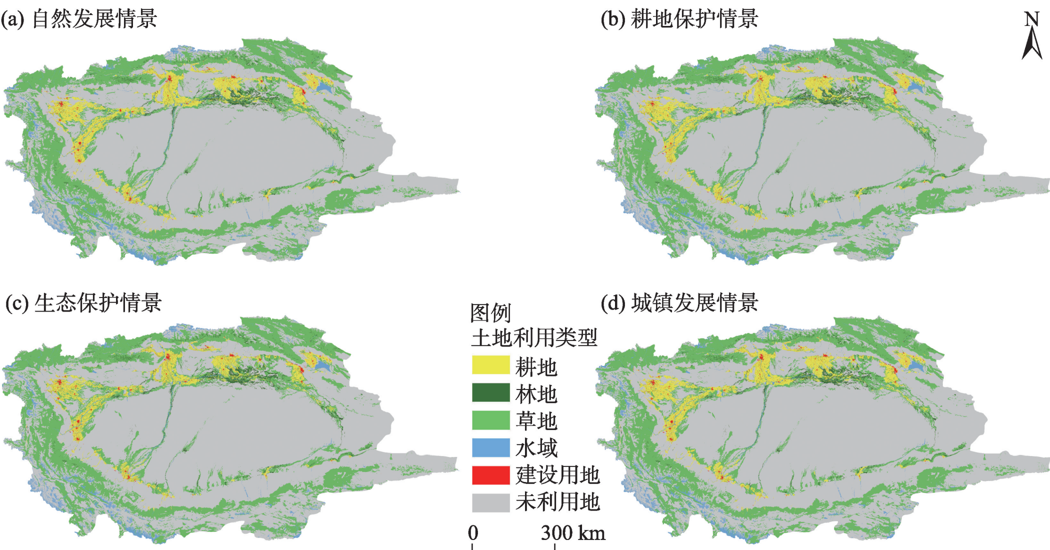


图5 2030年多情景下土地利用分布

Fig. 5 Distribution chart of land use in multiple scenarios in 2030

在耕地保护情景下：该情景抑制了耕地向其他土地类型转移，保护了耕地面积，控制建设用地向耕地的扩张，同时限制了林地、水域的转换；耕地、水域和建设用地面积扩张，分别增加了5660.01 km^2、276.39 km^2和6.03 km^2，林地、草地和未利用地呈减少态势，分别减少了193.14 km^2、5476.77 km^2和272.52 km^2，为保护耕地不向其他土地类型转换，建设用地的扩张受到了一定的限制，只增加了6.03 km^2。

生态保护情景下，该情景保护林地数量的同时限制林地、草地和水域向建设用地及未利用地的转移，耕地和未利用地面积分别减少了1728.90 km^2和272.52 km^2，耕地面积减少量最多，在此情景下采取了水域保护和退耕还林还草政策，林地和草地分别增加了638.82 km^2和389.61 km^2，但建设用地并没有得到有效控制，增加了696.60 km^2，其原因归结为当地建设用地集约利用水平较低，以及顺应新疆经济的发展，开通铁路沿线、完善基础设施建设以及开采化石燃料导致建设用地的增加。

城镇发展情景下除水域以外的土地类别均可向建设用地发生转移，同时限制了耕地向林地、草地和水域的转移。各地类均向建设用地转换，林地、草地和未利用地呈减少态势，分别减少了193.14 km^2、5476.68 km^2和272.52 km^2，建设用地、耕地和水域分别增加了467.19 km^2、5198.76 km^2和276.39 km^2。

综上所述，在耕地保护情景下能有效控制建设用地的扩张，其他3种情景保护下建设用地的扩张保持原有的变化状态。在生态保护情景下，耕地减少量较多，含碳量较高的林地和草地面积有所增加。因此，在耕地保护情景下，要同时进行生态保护，能有效控制建设用地面积的增加。

3.3 生态系统碳储量演化与预测分析

通过InVEST模型和PLUS模型评估和分析塔里木河流域40 a碳储量变化，并预测2030年的4个情景下的碳储量。从生态系统碳储量表8可知，40 a来碳储量总体呈增加趋势，总体增加了22.66×10^6 t，平均每年增加45.34×10^4 t。1980—1990年碳储量增加了2.13×10^6 t，相较于1980年增幅了0.04%；1990—2000年碳储量减少了20.01×10^6 t，相较于1990年减幅了0.37%；2000—2010年碳储量增加了34.76×10^6 t，相较于2000年增幅了0.66%；2010—2020年碳储量增加了5.78×10^6 t，相较于2000年增幅了0.10%。

到2030年，在自然资源、耕地保护、生态保护和城镇发展4种情景下，碳储量分别预测为53.3293×10^8 t、53.3717×10^8 t、53.3483×10^8 t和53.3295×10^8 t，较2020年分别减少了4.75×10^5 t、5.10×10^5 t、2.85×10^6 t和4.73×10^6 t。塔里木河流域的碳储量变化并没有发生明显变化，未利用地和草地仍是塔里木河流域主要的碳库，尽管1980—2020年草地的面积和碳储量有减少趋势。与2020年碳储量相比，4种发展情景各土地利用类型碳储量都有不同的变化。在自然发展、耕地保护和城镇发展情景下，耕地、水域和建设用地的碳储量分别增加了0.5087×10^8 t、0.0004×10^8 t和0.0017×10^8 t，耕地面积上升显著占总增加量的100.24%，水域和建设用地变化较为细微，林地、草地和未利用地分别减少了0.0332×10^8 t、0.4981×10^8 t和0.0123×10^8 t；在生态保护情景下，耕地和未利用地的碳储量显著下降了0.1643×10^8 t、0.0123×10^8 t，林地、草地、水域和建设用地碳储量分别增加了0.1097×10^8 t、0.0354×10^8 t、0.0004×10^8 t和0.0026×10^8 t。

表8 1980—2030年土地利用碳储量

Tab. 8 Carbon reserves for land use from 1980 to 2030

/10^8 t

年份	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	总计
1980年	2.3326	2.2127	23.1022	0.0475	0.0055	25.4497	53.1502
1990年	2.3316	2.2170	23.1205	0.0472	0.0056	25.4496	53.1715
2000年	2.5425	2.3261	22.4028	0.0482	0.0054	25.6464	52.9714
2010年	3.4216	2.2172	21.2003	0.0284	0.0131	26.4384	53.3190
2020年	4.0317	2.1813	20.6799	0.0287	0.0097	26.4455	53.3768
2030年自然发展情景	4.5257	2.1481	20.1818	0.0291	0.0114	26.4332	53.3293
2030年耕地保护情景	4.5697	2.1481	20.1818	0.0291	0.0098	26.4332	53.3717
2030年生态保护情景	3.8674	2.2910	20.7153	0.0291	0.0123	26.4332	53.3483
2030年城镇发展情景	4.5259	2.1481	20.1818	0.0291	0.0114	26.4332	53.3295

研究区在各个时期下碳储量变化存在差异，如图6所示：1980—2020年研究区碳储量分布变化小，较为明显的地区主要在该区的中西南部以及中东北部。2020—2030年自然发展、城镇发展情景下碳储量损失最多，主要在中西部方向；2020—2030年耕地保护、生态保护情景下，碳储量分布并没有发生很明显的变化。其中草地碳储量减幅较大，减少了2.4233×10^8 t，未利用地与耕地的碳储量增加了1.6991×10^8 t和0.9958×10^8 t，林地、水域和建设用地的碳储量没有明显变化。其中碳储量高值区主要集中在塔里木河及其分支河流上，该区域主要以草地、耕地和林地为主，碳储量低值区主要集中在沙漠带，该区域主要以未利用地为主。这与塔里木河流域的未利用地、草地分布一致，而围绕未利用地周围的土地利用类型主要是水域与耕地，其碳密度较高。结果表明，塔里木河流域土地利用类型与碳储量变化具有高度一致性。

3.4 土地利用变化对生态系统碳储量的响应

采用InVEST模型对塔里木河流域40 a土地利用变化所引起的碳储量变化进行评估，结果如表9所示。从时间变化来看，土地利用变化导致碳储量增加了22.6713×10^6 t，其中土壤碳储量增加21.5736×10^6 t，地上生物量储量增加4.2956×10^6 t，地下生物量碳储量减少4.7832×10^6 t。从不同地类来看，草地向未利用地转移损失碳储量最多，高达357.3192×10^6 t，其中土壤碳储量减少最多；林地向草地转移损失碳储量为43.8733×10^6 t，其中地上生物量碳储量减少最多；耕地向建设用地转移所损失12.0563×10^6 t的碳储量。由于过度开发土地资源，并未重视生态保护，导致土地沙漠化盐碱化日益严重，草地不断向未利用地转移，进而引起碳储量的减少。

其次，耕地→林地，草地→耕地和林地的转出，水域→其他土地利用类型的转出，建设用地→耕地，建设用地→林地、草地和未利用地的转出，未利用地→耕地、草地和林地的转出等土地利用变化都有利于碳储存，其中耕地向林地、草地向林地、水域向草地及未利用地、未利用地向耕地及草地的转出导致的碳储量变化较大；其他土地利用类型之间的转化都不利于研究区碳储存。林地和草地转为未利用地均使土壤碳储量大量减少，草地转为未利用地是碳储量减少的主要原因。其中水域与建设用地之间的转移几乎不引起碳储量的变化。

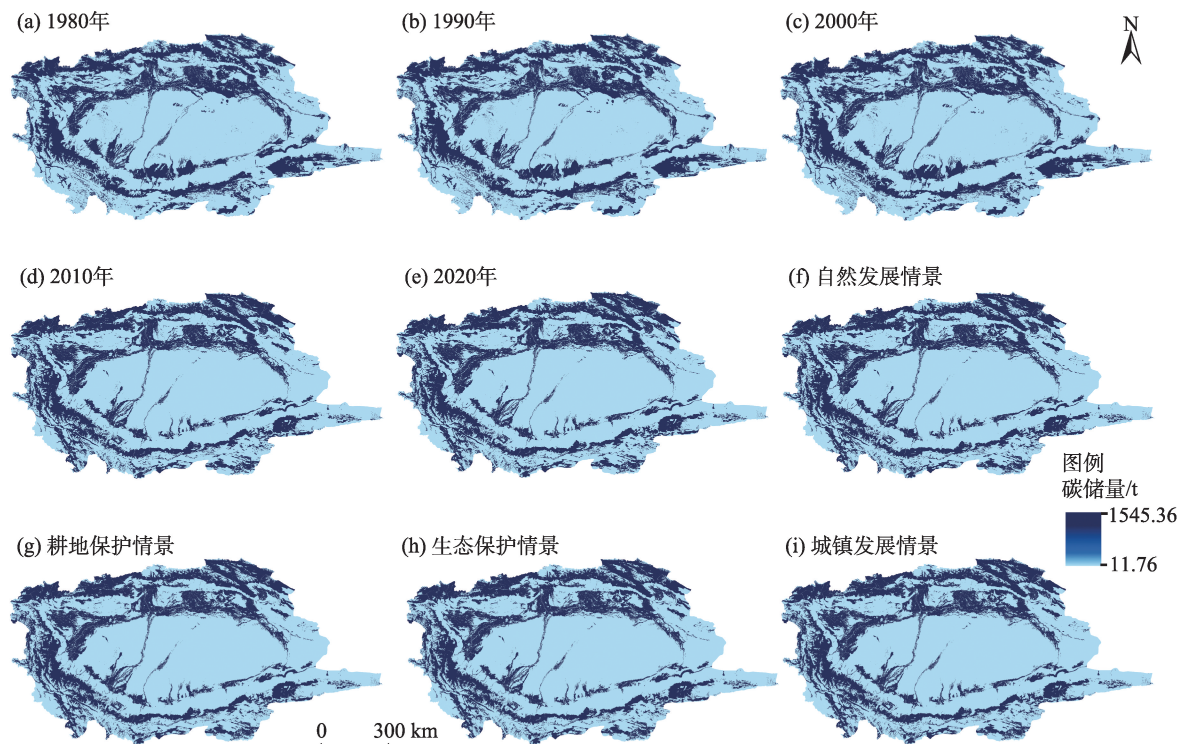


图6 1980—2030年生态系统碳储量分布

Fig. 6 Distribution of carbon reserves in ecosystem from 1980 to 2030

表9 1980—2020年土地利用变化引起碳储量变化

Tab. 9 Changes in carbon reserves caused by land use change from 1980 to 2020 /10^6 t

转换类型	地上生物量碳储量	地下生物量碳储量	土壤碳储量	死亡有机物碳储量	总碳储量
耕地→林地	3.4991	0.7096	3.6700	0.1295	8.0082
耕地→草地	−0.4314	0.1512	−0.1791	−0.1525	−0.6118
耕地→水域	−0.0559	−0.0740	−1.7823	−0.0256	−1.9378
耕地→建设用地	−0.2093	−0.3145	−11.3690	−0.1635	−12.0563
耕地→未利用地	−0.1390	−0.1464	−2.0337	−0.0589	−2.3781
小计	2.6634	0.3259	−11.6941	−0.2709	−8.9758
林地→耕地	−6.2481	−1.2671	−6.5533	−0.2313	−14.2999
林地→草地	−19.7664	−3.1410	−19.7380	−1.2278	−43.8733
林地→水域	−0.9380	−0.2687	−3.1442	−0.0643	−4.4152
林地→建设用地	−0.2040	−0.0534	−0.7055	−0.0144	−0.9773
林地→未利用地	−5.1821	−1.4052	−11.0918	−0.3528	−18.0319
小计	−32.3386	−6.1354	−41.2329	−1.8907	−81.5975
草地→耕地	4.2023	−1.4726	1.7444	1.4849	5.9590
草地→林地	23.0356	3.6605	23.0025	1.4309	51.1295
草地→水域	0.0486	−1.2327	−22.8375	−0.0591	−24.0806
草地→建设用地	0.0426	−0.1114	−2.7890	−0.0072	−2.8650
草地→未利用地	−0.3195	−31.8215	−323.4689	−1.7094	−357.3192
小计	27.0097	−30.9777	−324.3484	1.1402	−327.1763
水域→耕地	0.1132	0.1496	3.6058	0.0519	3.9204
水域→林地	0.8038	0.2303	2.6943	0.0551	3.7834
水域→草地	−0.1306	3.3137	61.3911	0.1589	64.7330
水域→建设用地	0.0010	0.0011	0.0000	0.0000	0.0021
水域→未利用地	−0.3083	0.6851	60.2365	0.0000	60.6133
小计	0.4790	4.3797	127.9277	0.2658	133.0522
建设用地→耕地	0.1485	0.2231	8.0658	0.1160	8.5535
建设用地→林地	0.3180	0.0832	1.0998	0.0225	1.5234
建设用地→草地	−0.0081	0.0212	0.5302	0.0014	0.5447
建设用地→水域	−0.0010	−0.0010	0.0000	0.0000	−0.0020
建设用地→未利用地	−0.0038	−0.0020	0.1246	0.0000	0.1187
小计	0.4535	0.3244	9.8204	0.1399	10.7382
未利用地→耕地	1.3583	1.4308	19.8711	0.5753	23.2356
未利用地→林地	4.2485	1.1520	9.0934	0.2893	14.7832
未利用地→草地	0.2498	24.8838	252.9471	1.3367	279.4175
未利用地→水域	0.0935	−0.2078	−18.2732	0.0000	−18.3875
未利用地→建设用地	0.0784	0.0409	−2.5377	0.0000	−2.4184
小计	6.0286	27.2998	261.1008	2.2013	296.6304
总计	4.2956	−4.7832	21.5736	1.5855	22.6713

4 讨论与结论

4.1 讨论

土地利用变化是一个复杂的过程，其受社会经济、自然环境等因素的共同影响[38-40]，本文选取社会经济、自然条件和交通区位3类驱动因子来模拟研究区土地利用格局，但土地利用发展还受政策及未来规划等的影响。因此为提高模型精准度，在后续研究中应将政策和未来规划加入驱动因子中。其次，碳储量会随着时间和环境发生改变，其指标选取来源于文献并存在一定差异，以致模型估算不准确，所以在今后的研究中，应加入实地调查数据对碳储量进行估算。同时采用双模型的耦合以此体

现PLUS模型在对未来土地利用的数量和空间进行模拟及InVEST模型对碳储量预测的优势，探究1980—2020年及2030年4种情景下塔里木河流域土地利用变化与碳储量的变化，为国家在进行环境保护时提供指导性思路。

通过对不同情景下土地利用变化及其碳储量的模拟与预测发现，若采取耕地保护措施，在一定程度上保护了耕地面积的同时也限制了建设用地的扩张，但生态效益却减少了；若采取生态保护措施，林地、草地可以得到自然发展，碳储量也得到保护，但是耕地面积却得不到保护。因此，未来应继续注重生物多样性的恢复，丰富湿地植被、改善土壤结构，从而增强区域的碳储能力。其次，林地、草地碳储能力较强，但现状占地比例较小，未来可以在植被稀疏地区培育适宜的植被类型，加强林草地的保护与修复，以提升区域碳储量；与未利用地相比，水田的碳储能力较强，因此可以在保障耕地红线的基础上选择适宜的地区发展水生农作物种植，包括实行水稻和旱地作物轮种的耕作方式。政府可以制定相关生态保护发展规划，采取因地制宜的措施，使塔里木河流城向更好的方向发展，保留现在所含碳储量的基础上再提高土地固碳能力，为实现"双碳"目标提供基础。

4.2 结论

本研究耦合PLUS模型和InVEST模型分析1980—2020年塔里木河流域土地利用和碳储量的变化，并预测2030年不同发展情景下土地利用变化及其生态系统碳储量的变化，得出以下结论：

（1）塔里木河流域在研究时段内耕地、建设用地和未利用地面积增加，林地、草地和水域面积减少，其中水域和未利用地变化最大，水域减少14382.09 km^2，未利用地增加22147.11 km^2。出现此情况原因是因为塔里木河流域气候干燥，加上人类活动导致断流，进一步加剧了土地沙漠化。

（2）1980—2020年研究区碳储量总体是上升趋势，总体增加了22.66×10^6 t，2030年在不同情景下的碳储量总体延续了2020年增长态势，2020—2030年耕地保护和生态保护情景下，未利用地与耕地的碳储量增加了37.37×10^6 t和1.23×10^6 t。

（3）2023年在自然发展情景下，耕地大幅度扩张、草地大幅减少，林地、水域、建设用地和未利用地有不同程度的扩张和缩小；在耕地保护情景下，除与自然发展情景有相同的变化外，耕地保护限制了建设用地向外的扩张；在生态保护情景下，耕地大幅下降，除未利用地小幅减少外其他地类均有不同程度增加；城镇发展情景与自然发展情景类似。

（4）2030年碳储量在自然发展、耕地保护、生态保护和城镇发展都有不同程度的增加或减少，在自然保护和城镇发展情景下，耕地、水域和建设用地的碳储量增加，耕地保护情景下除建设用地减少以外，耕地和水域下的碳储量也是增加态势，3个情景下的草地、林地和未利用地中的碳储量均减少。在生态保护情景下，除耕地和未利用地碳储量减少以外，其余地类所含碳储量均增加。

参考文献（References）

[1] 张凯琪, 陈建军, 侯建坤, 等. 耦合InVEST与GeoSOS-FLUS模型的桂林市碳储量可持续发展研究[J]. 中国环境科学, 2022, 42(6): 2799-2809. [Zhang Kaiqi, Chen Jianjun, Hou Jiankun, et al. Study on sustainable development of carbon storage in Guilin coupled with InVEST and GeoSOS-FLUS model[J]. China Environmental Science, 2022, 42(6): 2799-2809.]

[2] 夏文浩, 王铭扬, 姜磊. 新疆农业碳排放强度时空变化趋势与收敛分析[J]. 干旱区地理, 2023, 46(7): 1145-1154. [Xia Wenhao, Wang Mingyang, Jiang Lei. Spatiotemporal variation trends and convergence analysis of agricultural carbon emission intensity in Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(7): 1145-1154.]

[3] 孙方虎, 方凤满, 洪炜林, 等. 基于PLUS和InVEST模型的安徽省碳储量演化分析与预测[J]. 水土保持学报, 2023, 37(1): 151-158. [Sun Fanghu, Fang Fengman, Hong Weilin, et al. Evolution analysis and prediction of carbon storage in Anhui Province based on PLUS and InVEST model[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 151-158.]

[4] Cantarello E, Newton A C, Hill R A. Potential effects of future land-use change on regional carbon stocks in the UK Science Direct[J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(1): 40-52.

[5] 孙欣欣, 薛建辉, 董丽娜. 基于PLUS模型和InVEST模型的南京市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 生态与农村环境学报, 2023, 39(1): 41-51. [Sun Xinxin, Xue Jianhui, Dong Lina. Spatiotemporal change and prediction of carbon storage in Nanjing ecosystem based on PLUS model and InVEST model[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023, 39(1): 41-51.]

[6] 张海青, 任婷. 基于PLUS模型的空间格局演变特征及驱动力研究——以辽宁省北镇市为例[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版), 2022, 24(3): 230-238. [Zhang Haiqing, Ren Ting. Study on spatial pattern evolution characteristics and driving forces based on PLUS model: Taking Beizhen City in Liaoning Province as an example[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Social Sci-

ence Edition), 2022, 24(3): 230−238.]

[7] Lei T, Yu T, Wenxue F, et al. Dynamic simulation of land use/cover change and assessment of forest ecosystem carbon storage under climate change scenarios in Guangdong Province, China[J]. Remote Sensing, 2022, 14(10): 2330−2330.

[8] 裴亮, 陈晨, 戴激光, 等. 基于马尔科夫模型的大凌河流域土地利用/覆被变化趋势研究[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 525−531. [Pei Liang, Chen Chen, Dai Jiguang, et al. Research on forecast trend of land use and land cover change in Daling River Basin based on Markov model[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(3): 525−531.]

[9] 李玥康, 姚斯洋, 闫峰, 等. 基于改进元胞自动机−马尔可夫模型的土地利用格局演变模拟与预测: 以新余市为例[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(4): 71−83. [Li Yuekang, Yao Siyang, Yan Feng, et al. Improved cellular automata-Markov model-based simulation and prediction on evolution of land use pattern: A case of Xinyu City[J]. Water Conservancy and Hydropower Technology (Chinese and English), 2022, 53(4): 71−83.]

[10] 高周冰, 王晓瑞, 隋雪艳, 等. 基于FLUS和InVEST模型的南京市生境质量多情景预测[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(5): 1001−1013. [Gao Zhoubing, Wang Xiaorui, Sui Xueyan, et al. Multi-scenario prediction of habitat quality in Nanjing based on FLUS and InVEST models[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(5): 1001−1013.]

[11] 曹祺文, 顾朝林, 管卫华. 基于土地利用的中国城镇化SD模型与模拟[J]. 自然资源学报, 2021, 36(4): 1062−1084. [Cao Qiwen, Gu Chaolin, Guan Weihua. China's urbanization SD modelling and simulation based on land use[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(4): 1062−1084.]

[12] 顾汉龙, 马天骏, 钱凤魁, 等. 基于CLUE-S模型县域土地利用情景模拟与碳排放效应分析[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 288−296. [Gu Hanlong, Ma Tianjun, Qian Fengkui, et al. County land use scenario simulation and carbon emission effect analysis using CLUE-S model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9): 288−296.]

[13] 蒋小芳, 段翰晨, 廖杰, 等. 基于PLUS-SD耦合模型的黑河流域中游甘临高地区土地利用研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1246−1258. [Jiang Xiaofang, Duan Hanchen, Liao Jie, et al. Land use in the Gan-Lin-Gao region of middle reaches of Heihe River Basin based on a PLUS-SD coupling model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1246−1258.]

[14] 牛统莉, 熊立华, 陈杰, 等. 基于PLUS模型的长江流域土地利用变化模拟与多情景预测[J]. 武汉大学学报(工学版), 2024, 57(2): 129−141. [Niu Tongli, Xiong Lihua, Chen Jie, et al. Land use simulation and multi-scenario prediction of the Yangtze River Basin based on PLUS model[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2024, 57(2): 129−141.]

[15] 谢向东, 林孝松, 王莹, 等. 基于PLUS模型的重庆市南川区土地利用多情景模拟[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(6): 86−92. [Xie Xiangdong, Lin Xiaosong, Wang Ying, et al. Multi-scenario simulation of land use in Nanchuan District, Chongqing City based on PLUS model[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2023, 40(6): 86−92.]

[16] 李俊, 杨德宏, 吴锋振, 等. 基于PLUS与InVEST模型的昆明市土地利用变化动态模拟与碳储量评估[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 378−387. [Li Jun, Yang Dehong, Wu Fengzhen, et al. Dynamic simulation of land use changes and assessment of carbon storage in Kunming City based on PLUS and InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 378−387.]

[17] 许源溪, 周波, 苏杰. 基于InVEST模型的四川省宜宾市2010—2020年碳承载力评价[J]. 水土保持通报, 2023, 43(1): 350−358. [Xu Yuanxi, Zhou Bo, Su Jie. Carbon carrying capacity evaluation for Yibin City of Sichuan Provice based on the InVEST model during 2010—2020[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 43(1): 350−358.]

[18] 李月, 罗红芬. 基于InVEST模型的黔中喀斯特地区建设用地扩张碳储量变化研究[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(1): 185−192, 199. [Li Yue, Luo Hongfen. Carbon storage change of construction land expansion in central Guizhou's karst region based on InVEST model[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(1): 185−192, 199.]

[19] 杨潋威, 赵娟, 朱家田, 等. 基于PLUS和InVEST模型的西安市生态系统碳储量时空变化与预测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 175−182. [Yang Lianwei, Zhao Juan, Zhu Jiatian, et al. Spatial and temporal variation and prediction of ecosystem carbon storage in Xi'an based on PLUS and InVEST model[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 175−182.]

[20] 张鹏, 李良涛, 苏玉姣, 等. 基于PLUS和InVEST模型的邯郸市碳储量空间分布特征研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 338−348. [Zhang Peng, Li Liangtao, Su Yujiao, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of carbon storage in Handan City based on PLUS and InVEST models[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 338−348.]

[21] 林彤, 杨木壮, 吴大放, 等. 基于InVEST-PLUS模型的碳储量空间关联性及预测: 以广东省为例[J]. 中国环境科学, 2022, 42(10): 4827−4839. [Lin Tong, Yang Muzhuang, Wu Dafang, et al. Spatial correlation and prediction of land use carbon storage based on the InVEST-PLUS model: A case study in Guangdong Province [J]. China Environmental Science, 2022, 42(10): 4827−4839.]

[22] 王璐晨, 韩海辉, 张俊, 等. 塔里木河流域土地利用及人类活动强度的时空演化特征研究[J]. 中国地质, 2024, 51(1): 203−220. [Wang Luchen, Han Haihui, Zhang Jun, et al. Spatio-temporal evolution of land use and human activity intensity in the Tarim River Basin, Xinjiang[J]. Geology in China, 2024, 51(1): 203−220.]

[23] 唐芳. 塔里木河中下游土地利用时空变化分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023. [Tang Fang. Spatiotemporal variation of land use in the middle and lower reaches of Tarim River[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023.]

[24] 楚智, 徐长春, 罗映雪, 等. 基于生态保护红线管理的塔里木河流域土地利用模拟及生态效益评价[J]. 生态学报, 2021, 41(18): 7380-7392. [Chu Zhi, Xu Changchun, Luo Yingxue, et al. Land use simulation and ecological benefit evaluation in the Tarim River Basin based on ecological protection red line management[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(18): 7380-7392.]

[25] 吝静, 赵成义, 马晓飞, 等. 基于生态系统服务价值的塔里木河干流土地利用结构优化[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1140-1151. [Lin Jing, Zhao Chengyi, Ma Xiaofei, et al. Optimization of land use structure based on ecosystem service value in the mainstream of Tarim River[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1140-1151.]

[26] 郭靖, 王光焰, 徐生武, 等. 水资源管理增强下的塔里木河上中游碳储量动态评估[J]. 干旱区研究, 2021, 38(3): 589-599. [Guo Jing, Wang Guangyan, Xu Shengwu, et al. Dynamic assessment of Tarim River carbon storage under enhanced water resources management[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(3): 589-599.]

[27] 陈理庭, 蔡海生, 张婷, 等. 基于Markov-FLUS模型的饶河流域土地利用多情景模拟分析[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 3947-3958. [Chen Liting, Cai Haisheng, Zhang Ting, et al. Land use multi-scenario simulation analysis of Rao River Basin based on Markov-FLUS model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3947-3958.]

[28] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459. [Zhu Wenbo, Zhang Jingjing, Cui Yaoping, et al. Assessment of territorial ecosystem carbon storage based on land use change scenario: A case study in Qihe River Basin[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(3): 446-459.]

[29] 赵宁. 基于InVEST模型的渤海湾沿岸土地系统碳储量及生境质量评估[D]. 保定: 河北农业大学, 2020. [Zhao Ning. Assessment of carbon reserves and habitat quality of land system along Bohai Bay based on InVEST model[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2020.]

[30] 夏婷婷. 塔里木河流域土地利用变化及驱动因素分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023. [Xia Tingting. Analysis of land use change and drivers in the Tarim River Basin[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023.]

[31] 王绮, 魏冶. 基于非经济生物量的中国耕地碳汇空间分布研究[J]. 资源开发与市场, 2017, 33(8): 928-932. [Wang Qi, Wei Ye. Spatial pattern of arable land carbon sinks in China from the perspective of non-economic biomass[J]. Resource Development & Market, 2017, 33(8): 928-932.]

[32] 周圣杰. 土地利用数据对动态植被模式模拟中国陆地生态系统碳源汇影响的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022. [Zhou Shengjie. Study on the influence of land use data on carbon sources of terrestrial ecosystems in China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.]

[33] 颜安. 新疆土壤有机碳/无机碳空间分布特征及储量估算[D]. 北京: 中国农业大学, 2015. [Yan An. Spatial distribution characteristics and reserve estimation of organic/inorganic carbon in Xinjiang soil[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015.]

[34] Liang X, Guan Q F, Clarke K C, et al. Understanding the drivers of sustainable land expansion using a patch-generating land use simulation (PLUS) model: A case study in Wuhan, China[J]. Computers, Environment and Urban Systems, 2021, 85: 101569, doi: 10.1016/j.compenvurbsys.2020.101569.

[35] 杨玉海, 朱成刚, 汪洋, 等. 塔里木河下游生态输水对胡杨林生态系统碳循环的影响[J]. 干旱区地理, 2021, 44(3): 637-642. [Yang Yuhai, Zhu Chenggang, Wang Yang, et al. Effects of ecological water conveyance on carbon cycle of *Populus euphratica* forest ecosystem in the lower reaches of Tarim River[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(3): 637-642.]

[36] 刘华, 董玲, 艾吉尔·阿不拉, 等. 塔里木河中游柽柳灌丛碳储量及其价值评估[J]. 江西农业大学学报, 2015, 37(3): 484-489. [Liu Hua, Dong Ling, Abula Ajier, et al. Value of carbon sequestration of *Tamarix* in the midstream of the Tarim River[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2015, 37(3): 484-489.]

[37] 叶朝霞, 何秉宇, 董秀梅. 塔里木河下游生态环境整治与生态效应分析[J]. 新疆地质, 2005(1): 55-58. [Ye Zhaoxia, He Bingyu, Dong Xiumei. Analysis of ecological environment improvement and ecological effect in the lower reaches of Tarim River[J]. Xinjiang Geology, 2005(1): 55-58.]

[38] 柯新利, 唐兰萍. 城市扩张与耕地保护耦合对陆地生态系统碳储量的影响: 以湖北省为例[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 672-683. [Ke Xinli, Tang Lanping. Impact of cascading processes of urban expansion and cropland reclamation on the ecosystem of a carbon storage service in Hubei Province, China[J]. Acta Ecologlca Sinica, 2019, 39(2): 672-683.]

[39] Thompson T M. Modeling the climate and carbon systems to estimate the social cost of carbon[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change, 2018, 9(5): e532, doi: 10.1002/wcc.532.

[40] Wen H X,Yi G M,Ya J G, et al. Spatial-temporal pattern and spatial convergence of carbon emission intensity of rural energy consumption in China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2024, 31(5): 7751-7774.

Scenario projection analysis of ecosystem carbon stocks in the Tarim River Basin

FU Wei[1], XIA Wenhao[1], FAN Tongsheng[2], ZOU Zhen[1], HUO Yu[1]

(1. College of Economics and Management, Tarim University, Alar 843300, Xinjiang, China;

2. College of Natural Resources and Geodesy, Nanning Normal University, Nanning 530001, Guangxi, China)

Abstract: Land use patterns are important factors causing carbon stock changes in terrestrial ecosystems and play a critical role in maintaining the stability of carbon stock levels. This study uses the coupled PLUS-InVEST model to assess and predict land use and carbon stock changes in the Tarim River Basin, Xinjiang, China from 1980 to 2020. Four scenarios of natural development, ecological protection, arable land protection, and urban development were established. The land use and carbon stock trends in the study area in 2030 were predicted by scenarios, and the effects of land use changes on carbon stock were investigated. The results are as follows: (1) The area of cultivated land, construction land, and unutilized land in the Tarim River Basin increased significantly during the 40-a period, whereas the area of forest land, grassland, and water decreased. (2) Carbon stock exhibited an overall upward trend from 1980 to 2020, with an overall increase of 22.66×10^6 t. The area of carbon stock increase was mainly distributed on the main stream of the Tarim River and its branches during the 40-a period. Unutilized land and grassland are the main carbon reservoirs in the Tarim River Basin, accounting for 24.77% and 19.37% of the total carbon stock, respectively. (3) The different scenarios showed that the loss of carbon stock after 2020 was larger and the rate of loss gradually accelerated, the carbon stock reduction area was mainly distributed in the middle and southwest parts of the study area, and the transfer of grassland to unutilized land and forest land to grassland in the future was the main reason for carbon stock loss. The carbon stock loss under the four scenarios was reduced by 0.0475×10^8 t, 0.0051×10^8 t, 0.0285×10^8 t and 0.0473×10^8 t, respectively. (4) The transfer of cropland to woodland, grassland to woodland, watershed to grassland and unutilized land, and unutilized land to cropland and grassland are conducive to carbon storage. Therefore, in future planning, we should combine arable land and ecological protection, control the expansion of construction land to the outside while ensuring the growth of the local economy, increase carbon storage, and build up the strength to achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals.

Key words: Tarim River Basin; land use; carbon stock; PLUS model; InVEST model; Xinjiang